

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	2
1.2	Problemstellung	3
1.2.1	Latenz	4
1.2.2	Datenrate	5
1.2.3	Paketverlust	6
1.3	Lösungsansatz	7
1.3.1	Latenzen	7
1.3.2	Datenraten	8
1.3.3	Paketverlust	8
1.4	Ergebnisse der Arbeit	8
1.4.1	Filtern von ungeeigneten Verbindungen	9
1.4.2	Reservierung für Datenströme	9
1.4.3	Realistische Modellierung und reale Netze	11
1.5	Verwandte Arbeiten	11
1.5.1	Alternative Ansätze	11
1.5.2	Ergänzende Verfahren	13
1.6	Aufbau der Arbeit	14
<b>2</b>	<b>Grundlagen Wireless Mesh Networks</b>	<b>15</b>
2.1	Einordnung und Abgrenzung	15
2.1.1	Wireless Multi-Hop Networks	15
2.1.2	Wireless Mesh Networks	15
2.1.3	Mobile Ad-Hoc Networks	16
2.1.4	Wireless Sensor Networks	17
2.1.5	Funkstandards	17
2.1.6	Routingprotokolle	17
2.2	Der Wireless LAN Standard IEEE 802.11	18
2.2.1	Medienzugriff nach DCF	19
2.2.2	Medienzugriff nach PCF	19
2.2.3	Der Carrier-Sense-Bereich	19
2.2.4	Hidden Station und RTS/CTS	20
2.3	Modellierung des Netzwerkverhaltens	21
2.3.1	Bitübertragungsschicht	21

## Inhaltsverzeichnis

2.3.2	Anwendbarkeit existierender Propagationsmodelle . . . . .	22
2.3.3	Modellierung asymmetrischer und schwacher Verbindungen . . . . .	23
2.3.4	LLC-Schicht . . . . .	24
2.3.5	Medienzugriffsschicht . . . . .	25
2.4	Simulation . . . . .	26
2.4.1	Der Netzwerksimulator NS-2 . . . . .	26
2.4.2	Realitätsnähe der Modellierung . . . . .	26
2.5	Effekte in Wireless Mesh Networks . . . . .	27
2.5.1	Selbstinterferenz . . . . .	27
2.5.2	Blocked-Station-Problem . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Mesh-Routing mit beschränktem Paketverlust</b>	<b>31</b>
3.1	Routingprotokolle und ungeeignete Verbindungen . . . . .	32
3.1.1	Probleme von OLSR . . . . .	32
3.1.2	Routing mit Verlust-minimierenden Metriken . . . . .	34
3.1.3	Probleme des Reverse-Path-Routings . . . . .	35
3.1.4	Ergebnis der Betrachtung . . . . .	36
3.2	Filtern ungeeigneter Verbindungen . . . . .	37
3.2.1	Allgemeiner Ansatz . . . . .	37
3.2.2	Identifizierung schwacher Verbindungen . . . . .	38
3.2.3	Identifizierung symmetrischer Verbindungen . . . . .	40
3.2.4	Evaluation der Filtermechanismen . . . . .	41
3.2.5	Wechselwirkung mit realistischer Simulation . . . . .	42
3.3	Design der Routingsoftware . . . . .	43
3.3.1	Auswahl eines Routingverfahrens . . . . .	43
3.3.2	Funktionsweise des Link-State-Routings . . . . .	44
3.3.3	Schnittstellen des Link-State-Routings . . . . .	45
3.4	Implementierung . . . . .	46
3.4.1	Abstraktionsschicht GEA . . . . .	47
3.4.2	Integration als virtuelles Layer-2-Netzwerk . . . . .	49
3.4.3	Modularisierung der Software . . . . .	51
3.5	Zusammenfassung . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Cluster-basierte Ressourcenverwaltung</b>	<b>55</b>
4.1	Grundlegende Idee . . . . .	56
4.2	Anpassung und Erweiterung von RGCP . . . . .	56
4.2.1	Zuverlässiger Multicast . . . . .	57
4.2.2	Atomarer Multicast . . . . .	57
4.2.3	Verwaltung der Gruppenzugehörigkeit . . . . .	57
4.2.4	Zeitschranken . . . . .	58
4.3	Clusterbildung . . . . .	58
4.3.1	Clusterstruktur . . . . .	58

4.3.2	Clustering-Protokoll	59
4.4	Scheduling des Medienzugriffs	60
4.4.1	Intracusterscheduling	60
4.4.2	Interclusterscheduling	63
4.4.3	Sender im Carrier-Sense-Bereich	64
4.5	Eigenschaften des Intracusterprotokolls	65
4.5.1	Zuverlässiger Multicast	65
4.5.2	Maximale Paketauslassung	66
4.5.3	Zeitschranken innerhalb eines Clusters	66
4.5.4	Prioritätsklassen	69
4.6	Propagation von Topologieinformationen	70
4.7	Forwarding durch Cluster	70
4.8	Pfadsuche für QoS-Verbindungen	71
4.8.1	Idee der optimistischen reaktiven Pfadsuche	72
4.8.2	Umsetzung der optimistischen reaktiven Pfadsuche	72
4.8.3	Beschränkung der Pfadlänge	75
4.8.4	Optimalitätsbetrachtung	77
4.8.5	Behandlung von Verbindungsabbrüchen	78
4.9	Prototypische Implementierung	79
4.9.1	Nutzung der DCF	79
4.9.2	Zeitschlitzlänge	79
4.10	Bewertung des Verfahrens	80
4.10.1	Zeitschranken	81
4.10.2	Garantien für Datenraten	81
4.10.3	Vergleich mit Best-Effort-Datenverkehr	82
4.11	Verwandte Arbeiten	83
4.11.1	Cluster-basierte Routing-Verfahren	83
4.11.2	Core Extraction Distributed Ad hoc Routing (CEDAR)	84
4.11.3	Clustering-based Channel Capacity Routing (CBCCR)	84
4.11.4	Channel Capacity-based Routing (CCBR)	85
4.11.5	Adaptive Cluster-based Routing (ACBR)	85
4.11.6	Pfadsuche	85
4.12	Zusammenfassung	87
<b>5</b>	<b>Dezentrale Ressourcenverwaltung</b>	<b>89</b>
5.1	Sendezeit als teilbare Ressource	89
5.2	Lokaler Akzeptanztest	90
5.2.1	Summen-Akzeptanztest	91
5.2.2	Clique-Akzeptanztest	92
5.3	Existierende Ansätze	94
5.3.1	Ad-Hoc QoS On-Demand Routing	94
5.3.2	Beachtung der benachbarten freien Sendezeiten	94

## Inhaltsverzeichnis

5.3.3	Beachtung des Carrier-Sense-Bereichs	95
5.4	Probleme der existierenden Ansätze	96
5.4.1	Reservierungsfehler durch inkonsistente Werte	97
5.5	Maßnahmen zum Verhindern von Inkonsistenzen	98
5.5.1	Berücksichtigung der Selbstinterferenz	99
5.5.2	Reaktives Versenden von Updates	99
5.5.3	Fehlerwahrscheinlichkeit	100
5.6	Atomare Reservierungsoperationen	100
5.6.1	Basisprotokoll	100
5.6.2	Behandlung von Paketverlusten	101
5.6.3	Verhindern von Deadlocks	101
5.6.4	Behandlung von Topologieänderungen	102
5.6.5	Frühzeitige Erkennung von Ablehnungen	103
5.6.6	Verbessern der Akzeptanzrate	103
5.7	Bewertung des Verfahrens	105
5.8	Verwandte Arbeiten	105
5.8.1	Beobachtung des durchgeleiteten Datenverkehrs	105
5.8.2	Bestimmung der Belegt-Zeiten des Mediums	106
5.8.3	Anpassung des Carrier-Sense-Schwellwertes	106
5.8.4	Betrachtung der Sendeverzögerung	107
5.9	Zusammenfassung	108
<b>6</b>	<b>Zentral koordinierte Ressourcenverwaltung</b>	<b>109</b>
6.1	Architektur	110
6.1.1	Ablauf einer Reservierung	110
6.1.2	Behandlung von Topologieänderungen	111
6.1.3	Reservierung von gefluteten Datenströmen	111
6.2	Akzeptanztest mit gradueller Interferenz	112
6.2.1	Modellierung der gegenseitigen Interferenz	113
6.2.2	Akzeptanztest	113
6.2.3	Verifikation der Reservierung	114
6.3	Messung der Interferenz	114
6.3.1	Idee der Interferenzmessung	115
6.3.2	Messverfahren für Knotenpaare	116
6.3.3	Aufbau der Konfliktmatrix	117
6.3.4	Diskussion der Kapazitätssteigerung	118
6.3.5	Implementierung	121
6.4	Pfadsuche	123
6.4.1	Existierende Ansätze	123
6.4.2	Komplexitätsbetrachtung	124
6.4.3	Einfaches Shortest-Path-Routing	126
6.4.4	Gefiltertes Shortest-Path-Routing	126

6.4.5	Shortest-Path mit Selbstinterferenzschätzung . . . . .	127
6.4.6	Vergleich der Pfadsucheverfahren . . . . .	128
6.5	Anbindung an Anwendungssoftware . . . . .	129
6.5.1	Schichtenübergreifende Integration mit RSVP . . . . .	130
6.5.2	Anbindung über eine Publish/Subscribe-Middleware . . . . .	132
6.6	Zusammenfassung . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	139
7.1.1	Ergebnisse der Arbeit . . . . .	139
7.1.2	Vergleich der Reservierungsverfahren . . . . .	141
7.2	Ausblick . . . . .	142
	<b>Anhang</b>	<b>145</b>
<b>A</b>	<b>Propagationsmodelle</b>	<b>147</b>
A.1	Decibel-Skala . . . . .	147
A.2	Propagationsmodelle . . . . .	147
A.2.1	Free-Space-Modell . . . . .	147
A.2.2	Two-Ray-Ground-Reflection-Modell . . . . .	148
A.2.3	Log-Normal-Shadowing-Modell . . . . .	148
A.2.4	Ricean-Propagationsmodell . . . . .	150
<b>B</b>	<b>Messung in Routing mit Filterschicht</b>	<b>153</b>
B.1	Szenario . . . . .	153
B.2	Messverfahren . . . . .	153
B.3	Ergebnisse . . . . .	155
<b>C</b>	<b>Ergänzungen zum Cluster-basierten Reservierungsverfahren</b>	<b>157</b>
C.1	Propagation der Topologieinformationen . . . . .	157
C.2	Beweis zur Terminierung der Pfadsuche . . . . .	161
<b>D</b>	<b>Evaluation dezentraler Reservierungsverfahren</b>	<b>165</b>
D.1	Simulationsmodell . . . . .	165
D.2	Parametrisierung der Topologiedichte . . . . .	166
D.3	Fehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	167
D.4	Kosten pro Reservierung . . . . .	168
D.5	Evaluation des verbesserten Akzeptanztests . . . . .	169
<b>E</b>	<b>Evaluation des zentralisierten Reservierungsverfahrens</b>	<b>171</b>
E.1	Simulationsmodell . . . . .	171

## *Inhaltsverzeichnis*

E.1.1	Aufbau der Szenarien . . . . .	171
E.1.2	Auswertung der Szenarien . . . . .	172
E.2	Experimentelle Verifikation des Kalibrierungsverfahrens . . . . .	174
E.2.1	Erkennung von Nicht-Beeinflussung . . . . .	174
E.2.2	Erkennung von gegenseitiger Beeinflussung . . . . .	176
E.3	Kapazitätssteigerung durch Kalibrierung . . . . .	176
E.3.1	Aufbau der Szenarien . . . . .	177
E.3.2	Auswertung der Szenarien . . . . .	178
E.4	Evaluation der Pfadsuche . . . . .	179
E.4.1	Donut-Topologien . . . . .	179
E.4.2	Realistische Topologien . . . . .	181
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>185</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>		<b>199</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>203</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>205</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>209</b>